

論文 プレストレストコンクリート・プレキャストコンクリート部材における ASR 劣化の事例検証

尾花 祥隆¹・鳥居 和之²

要旨：最近、プレストレストコンクリートおよびプレキャストコンクリート（以下、PC および PCa）において、アルカリシリカ反応（以下、ASR）による劣化事例が発見されている。本研究は、PC および PCa における ASR 劣化の事例を部材の使用・環境条件や骨材の反応性、コンクリートの配合、養生条件などより検証したものである。その結果、ASR にあまり注意が払われなかった川砂や山砂による ASR の発生および ASR 抑制対策以後の劣化発生より問題点が明らかになった。

キーワード：ASR, PC・PCa, 使用・環境条件, 配合, 養生

1. はじめに

PC および PCa は、橋梁や舗装、タンクなどに使用されてきたが、それらの部材に ASR による劣化が発見されている¹⁾。通常、PC および PCa は、高強度のコンクリート（低水セメント比）であるので、ASR に対しては、水分やアルカリの移動度を低下させることによる抑制効果と、単位セメント量の増大（アルカリの増大）にともなう促進効果との相反する要因があるとされている。また、PC および PCa では蒸気養生やオートクレーブ養生が実施されることも多く、それらが ASR を促進する要因になることが指摘されている²⁾。

一方、ASR 抑制対策（昭和 61 年）以後、わが国では ASR の発生が減少してきたのは事実である。しかし、当時は、反応性骨材の種類とコンクリートの配合、構造物の使用・環境条件などの各種要因の組み合わせにより、構造物の ASR による劣化状況が大きく相違することが十分に把握されていなかった。また、ASR による劣化事例は公表されていないものが多くあり、ASR 発生の原因が実際にどこにあったのかが十分に究明されておらず、ASR 抑制対策にその経験が活かされることがなかった

のは残念なことである²⁾。

本研究は、PC および PCa における ASR 劣化の特徴を調べるとともに、それぞれの ASR 劣化の事例を部材の使用・環境条件や骨材の反応性、コンクリートの配合、養生条件などから検証したものである。

2. 調査概要

2.1 PC および PCa 部材の概要

ASR 劣化が発生した PC および PCa 部材の概要を表-1 に示す。PC および PCa の ASR による劣化状況の現地調査では、ひび割れの幅と形態、変色、ゲルの滲出、部材の変形および鉄筋の腐食、などを測定した。また、設計図書より、骨材の種類とその反応性、コンクリートの配合と養生条件、部材の使用・環境条件について調査した。PC および PCa のコンクリートの配合を表-2 に示す。また、部材よりコアを多数採取し、コンクリートの力学的性質を調べるとともに、ASR ゲルの生成状況およびその化学組成を酢酸ウラニル蛍光法およびエネルギー分散型 X 線回折装置付き走査型電子顕微鏡（SEM-EDS）により測定した。

表-1 調査対象となった PC・PCa 部材の概要

	部材の種類	建設年次(年)	設置場所	コンクリートの種類			設計基準強度(N/mm ²)
				セメントの種類	骨材の種類		
					細骨材	粗骨材	
事例Ⅰ	PCaⅠ(石川県・擁壁)	1996	山間部	BB	山砂	安山岩碎石*	30
事例Ⅱ	PCaⅡ(石川県・電柱)	1999	市街地	OPC	川砂*	川砂利	50
事例Ⅲ	PCaⅢ(富山県・ロックシェッド)	1980	山間部	HPC	川砂	川砂利*	74
事例Ⅳ	PCⅠ(東京都・舗装)	1998	港湾部	OPC	山砂*	石灰石碎石	40
事例Ⅴ	PCⅡ(青森県・水槽)	1980	市街地	HPC	川砂	安山岩碎石*	40
事例Ⅵ	PC 梁試験体(事例検証用)	2005	市街地	HPC	安山岩砕砂*	安山岩碎石*	50

OPC：普通ポルトランドセメント，BB：高炉セメント B 種，HPC：早強ポルトランドセメント

*：酢酸ウラニル蛍光法により ASR ゲルが確認された細・粗骨材

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科 社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科 社会基盤工学専攻 教授 工博 (正会員)

表-2 PCおよびPCaのコンクリートの配合

事例	G _{max} (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
						W	C	S	G	混和剤
PCa I	20	8±2	2±1	49	35	182	370	622	1204	0.74
PCa II	20	8±2	2±1	31	44	160	520	746	983	7.8
PCa III	20	3±1	2±1	28	34	134	480	614	1237	---
PC I	20	8±2	2±1	35	33	172	492	533	1137	5.31
PC II	25	8±2	2±1	コンクリートの配合不明						
PC 梁試験体	25	10±2.5	2±1	38	44	150	395	839	1048	1.2



写真-1 PC梁部材の劣化状況 (材齢15ヵ月)

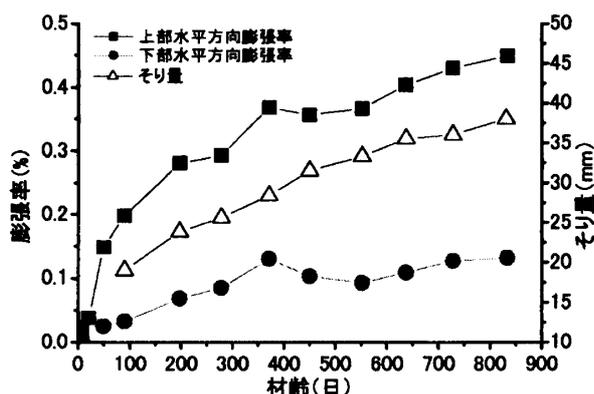


図-1 PC梁試験体の膨張率およびそり量の経時変化

2. 2 PC梁のASR劣化の検証試験

屋外自然環境下における、PC梁のASR劣化の特徴を把握する目的で、PC梁の膨張率や超音波伝播速度、そり量などの測定を実施している。PC梁試験体は、断面150mm×300mm×長さ3000mmに1S15.2のPC鋼材を下縁より50mmの位置に1本配置したものである。骨材のASR膨張を早期に発生させるためにアルカリ(NaCl)を等価Na₂O量が10kg/m³になるように添加した。初期養生条件は蒸気養生(60℃)とし、打設後18時間経過後、プレテンション方式にてプレストレスを導入した。その後、約2週間経過した後に、岐阜県の工場敷地内にて約2年間暴露した^{3), 4)}。

3. PC梁のASR劣化の特徴

屋外暴露を実施したPC梁試験体の膨張率およびそりの経時変化を図-1に示す。PC梁試験体(反応性骨材:

安山岩砕砂および砕石)は暴露開始より膨張が始まり、一夏経過後には特徴的なひび割れが発生した。すなわち、PC梁試験体のひび割れは、上部と下部の拘束条件の相違より、上部では亀甲状のもの、下部ではPC鋼線に沿った水平方向のものが卓越するという形状になった(写真-1参照)。同時に、上部と下部との膨張率の相違がPC梁試験体に大きなそりを発生させた。

能登地方におけるPC桁のASRによる劣化事例(反応性骨材:安山岩砕石)を写真-2および3に示す。PC箱桁の事例(写真-2参照)では、施工時の打ち継ぎに沿って水平方向の大きなひび割れが発生し、ASRゲルがひび割れから滲み出ている。PC箱桁は構造的に内部に水が溜まりやすいので、長期にわたりASRが進行し、大きな損傷が発生したものと考えられる。一方、一般的な形式であるポステンPC桁の事例(写真-3参照)では、降雨の影響を受ける耳桁にてASR劣化がもっとも進行する傾向があり、桁端部や下フランジ部にPC鋼材に沿ったひび割れが発生した。特に、海岸部や凍結防止剤が散布される地域では、水分や塩分の浸透によってPC鋼材の腐食が促進される懸念があるので、厳しい塩分環境下ではPC耳桁の表面塗装(写真-4参照)を早期に実施するのが効果的であった。

ASRが発生したPC桁では、PC鋼材に沿ったひび割れが生じるが、ひび割れ幅が0.5mm程度と比較的小さいことが特徴である。しかし、写真-1に示すように、PC桁に発生した変形やそりによって、桁端部や沓座付近にてコンクリートの局所的な破壊が生じることがあるので、維持管理の際には、それらの箇所を注意して点検する必

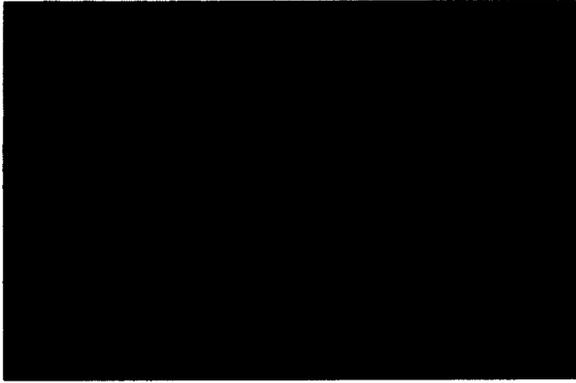


写真-2 PC箱桁の劣化状況

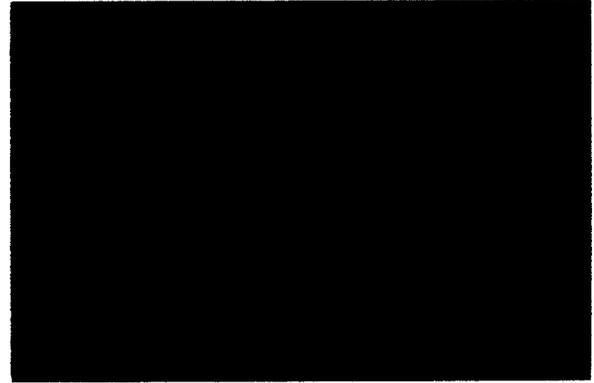


写真-3 ポステンPC桁の劣化状況



写真-4 ポステンPC耳桁への表面塗装処理



写真-5 コンクリート製品(PCa I)の劣化状況

要がある。

4. コンクリート製品のASR事例の検証

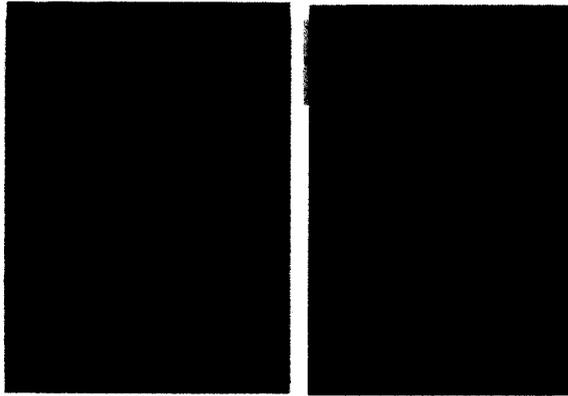
4.1 PCa製品のASR事例(I)

PCa製品(井桁擁壁)のASRによる劣化状況を写真-5に示す。このPCa部材では、約2年でコンクリートに幅0.5~1.0mmのひび割れが発生し、コンクリートの表面が一部分はく離した。また、PCa部材は断面が薄く、鉄筋量も少ないために、ASRによる膨張によって横梁部材で座屈も発生した。さらに、この擁壁のある道路では、凍結防止剤が多量に散布されており、ひび割れからの塩分の浸入により、鉄筋が顕著に腐食していた。コンクリートには細骨材として川砂(非反応性)、粗骨材として安山岩砕石が用いられていた。安山岩砕石は、化学法(JIS A 1145)の結果($Sc = 332\text{mmol/l}$, $Rc = 242\text{mmol/l}$, $Sc/Rc = 1.37$)より、「無害でない」と判定されたものであった。このため、PCa部材にはASR抑制対策として高炉セメントB種が使用されていた。高炉セメントを使用したにもかかわらず、ASR劣化が発生した原因としては、高炉セメントB種の置換率が38%程度(推定値)と小さかったことが指摘できる。この事例は、コンクリートに使用した安山岩砕石の反応性が高く、同時に蒸気養生(70℃)も実施されていたので、高炉セメントB種によ

ってASRの発生を完全には抑制することができなかった事例である。

4.2 PCa製品のASR劣化事例(II)

PCa製品(電柱)のASRによる劣化状況を写真-6に示す。このPCa製品は、市街地に設置され、日射および水分の供給を常時受ける環境条件にあった。建設後2,3年で、地面に近い箇所、PC鋼線に沿った幅1mm程度の縦方向のひび割れが発生し、コンクリートの変色およびASRゲルの滲出も確認された。コンクリートには富山県内の川砂と川砂利が用いられていた。PCa製品の水セメント比は31%で、蒸気養生およびオートクレーブ養生が実施されていた。PCa製品は単位セメント量が 520kg/m^3 であり、そのアルカリ総量は 3.6kg/m^3 となった。化学法(JIS A1145)の結果より、使用した川砂および川砂利は Sc および Rc の値がともに 50mmol/l 以下であり、「無害」と判定されていた。しかし、コンクリートの反応の痕跡を調べると、川砂には安山岩粒子(黒色)が少量含まれており、その周囲にASRゲルが観察された。この地域(富山県)の川砂は化学法(JIS A1145)の判定ライン付近にプロットされるものが多くあり、通常の品質管理試験(半年に1回の試料検査)では、骨材のASR反応性を適切に評価できない場合があることが指摘されている⁵⁾。このように、クリストバライトやオパールを含



(a) 縦方向のひび割れ (b) ASR ゲルの滲出
写真-6 コンクリート製品 (PCa II) の劣化状況



写真-8 コアを貫通したひび割れ

有する火山岩粒子が混入する川砂は、ベシマム現象が顕著に現れるので、化学法 (JIS A1145) で「無害」と判定された場合にも ASR が発生することがあることに注意が必要である。したがって、単位セメント量が多くなる PCa 製品では、骨材の品質管理としてより厳しい試験法 (例えば、少量の反応性骨材の検出に適した ASTM C1260 やデンマーク法) を採用するなどの対処が必要であった。

4. 3 PCa 製品の ASR による劣化事例 (III)

PCa 製品 (ロックシェッド) の ASR による劣化状況を写真-7 に示す。PCa 柱部材は ASR 抑制対策以前に製造されたもので、建設後約 30 年が経過しており、立山山麓の山間部に設置されていた。骨材には新潟県内の川砂および川砂利が使用されていた。この川砂利と同一採取地の骨材による化学法 (JIS A1145) の結果では、 $S_c=22\text{mmol/l}$, $R_c=92\text{mmol/l}$, $S_c/R_c=0.24$ となり、「無害」と判定された。しかし、ASTM C1260 の膨張率は 14 日材齢で 0.23% となり、「有害」と判定された⁶⁾。PCa 柱部材 (設計基準強度: 74N/mm^2) は単位セメント量が 480kg/m^3 であり、そのアルカリ総量は 3.8kg/m^3 となった。PCa 柱部材のひび割れは拘束の影響が強く現れており、柱部材の縦方向に PC 鋼棒に沿った幅 2~3mm のひび割れが発生した。また、凍結防止剤が散布された PCa 柱部

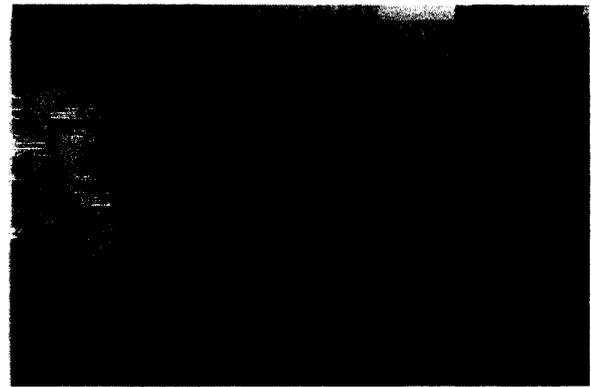


写真-7 コンクリート製品 (PCa III) の劣化状況

材の脚部では鋼材腐食による錆汁や断面欠損も観察された。PCa 柱部材から採取したコアのひび割れ状況を写真-8 に示す。PC 部材の側面のひび割れは 2 本の PC 鋼棒を通して部材断面を貫通していた。酢酸ウラニル蛍光法による観察結果より、川砂利中に含まれる安山岩粒子 (黒色) の周囲に ASR ゲルの生成が確認された。本事例では、ASR によるひび割れが凍結融解の繰り返しによりさらに進展したものであり、ASR と凍害との複合劣化が誘発された事例と推察された。

5. 現場打ち PC コンクリートの ASR 劣化事例の検証

5. 1 PC 舗装の ASR による劣化事例 (I)

PC 舗装の ASR による劣化状況を写真-9 に示す。PC 舗装 (東京港湾岸) は日射および水分供給をともに受ける厳しい環境に曝されていた。PC 舗装は建設後約 2 年が経過した時点で舗装表面に幅 0.5~1.0mm のひび割れが発生し、拘束鉄筋量が少ない構造であるので、その後すぐに破壊し、取り替えられた。PC 舗装では、プレストレスにより軸方向の拘束を受ける中央部では PC 鋼材に沿ったひび割れ (写真-10 参照) となり、拘束のない端部では亀甲状のひび割れ (写真-11 参照) となった。本 PC 舗装は、コンクリートのアルカリ総量は約 2.2kg/m^3 であり、規制値の 3.0kg/m^3 以下であった。PC 舗装には粗骨材として石灰石碎石、細骨材として山砂が使用されていた。石灰石碎石は化学法 (JIS A1145) が適用できない骨材であるが、わが国のものは ASR が発生しないことが知られている (諸外国では石灰石中の微晶質石英により ASR が発生している事例がある)。一方、山砂は化学法 (JIS A1145) で「無害でない」と判定され、モルタルバー法 (JIS A1146) で「無害」と判定されていた。しかし、モルタルバー法では 0.08% の膨張率 (判定基準値 0.100% 以下) があつた。コアの破断面の観察より、写真-12 に示すように、石灰石には反応がみられず、1~3mm 程度の細骨材 (黒色または褐色の粒子) にのみ反応環 (リ

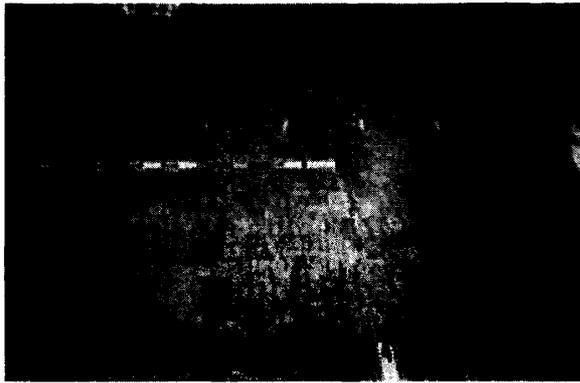


写真-9 PC 舗装の劣化状況

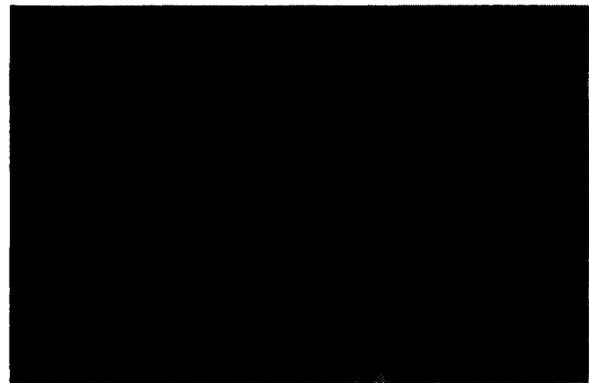


写真-10 PC 鋼材に沿ったひび割れ (中央部)

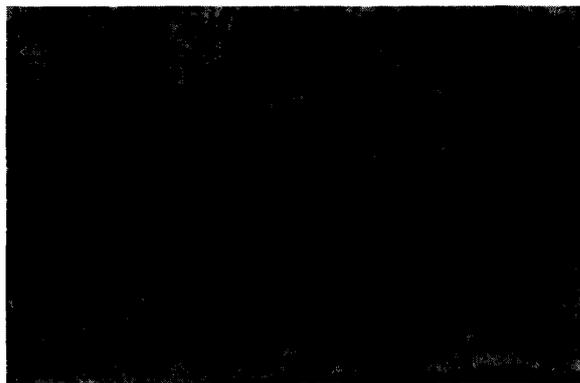


写真-11 亀甲状のひび割れ (端部)

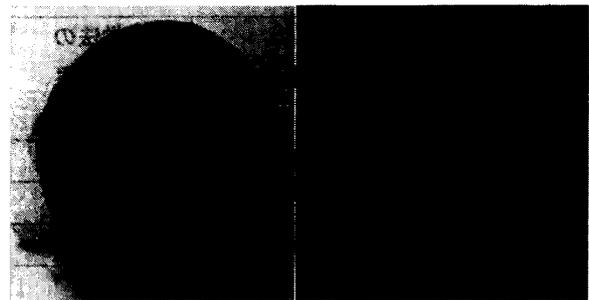


写真-12 コアの破断面の酢酸ウラニル蛍光法による観察結果

ム) および ASR ゲルが確認された。黒色および褐色の粒子はそれぞれ安山岩および溶結凝灰岩であると同定された。石灰石はアルカリを消費しないために、山砂中の限られた粒子のみが反応していることに注目する必要がある (ASR が発生するアルカリ量は反応性骨材量との間の相対的な関係で決まると捉えるべきである)。したがって、PC 舗装のように、断面が薄く、拘束鉄筋量の少ない部材で ASR が一旦発生すると、早期に部材の破壊に至ることから、骨材の選定には十分に注意する必要がある。本事例の周辺の構造物では、その後も ASR による劣化事例が相次いで発見されており、新たな警鐘が鳴らされている。

5. 2 PC 水槽の ASR による劣化事例 (II)

PC 水槽の ASR による劣化状況を写真-13 および 14 に示す。水槽という構造物の機能上、内部に水が貯留され、内部からも常に水分が供給される条件であるため、ASR の発生しやすい使用環境条件下にある。PC 鋼材による拘束の受けない、RC 構造の水槽の上面では亀甲状のひび割れが発生し、側面では PC 鋼材に沿った周方向および縦方向に幅 1~2mm 程度のひび割れが発生していた。水槽の建設年時は 1980 年であり、ASR 抑制対策以前のものであった。コンクリートには細骨材として川砂、粗骨材として安山岩碎石が用いられていた。コアの観察を行った結果、安山岩碎石には反応リムや骨材に多数の

ひび割れが確認された。また、SEM-EDS 分析および酢酸ウラニル蛍光法では、安山岩碎石だけでなく川砂の一部の粒子にも ASR ゲルの痕跡が確認された。本水槽は、積雪寒冷地に設置されていたことから、当初はひび割れの発生原因は凍害によるものとされていた。水密性が要求される水槽では、ひび割れの発生が水漏れなどの深刻な事態を発生させることもあるので、ひび割れの追跡などの点検強化が必要となった。

6. まとめ

本研究では、PC および PCa 部材での ASR による劣化事例の検証を行った。これらの事例から現行の ASR 抑制対策の問題点についてまとめると、表-3 に示すとおりである。

現在のセメントのアルカリ量は、ASR 抑制対策 (昭和 61 年) として提案された、低アルカリ形セメントのアルカリ量 (0.6%以下) 以下のものがほとんどである。したがって、ASR 抑制対策として推奨されているアルカリの総量規制値 (3.0kg/m^3 以下) を満足しないコンクリートは、本研究にて ASR 事例を検証した高強度コンクリート (単位セメント量が 500kg/m^3 以上) のものに限定されている。しかし、反応性が高い安山岩碎石やペシマム現象が顕著である川砂や山砂を使用したコンクリートで実際に ASR 発生している事実を考慮すると、それらの反応



写真-13 PC水槽の劣化状況（上面）



写真-14 PC水槽の劣化状況（側面）

表-3 ASRの発生原因と現行のASR抑制対策との関係

事例	反応性骨材	化学法の 判定結果 (JIS A1145)	アルカリ総量 (kg/m ³)	ASRの発生原因
PCa I	安山岩碎石	無害でない	2.9	BBのスラグ置換率
PCa II	川砂	無害	3.6	川砂(CT)のペシマム現象
PCa III	川砂利	無害	3.8	川砂利(CT)のペシマム現象
PC I	山砂	無害	2.2	山砂(CT)のペシマム現象
PC II	安山岩碎石	無害でない	—	ASR抑制対策以前

CT: クリストパライト

性骨材に対するアルカリ総量規制値は 2.0 kg/m³ 程度までさらに厳しくすべきであったと判断される。また、骨材の ASR 試験法では、化学法 (JIS A 1145) による判定がもっとも普及しているが、本試験法の限界 (適切に判定ができない骨材があること) を十分に理解しておくべきであり、反応性骨材の種類によっては、より厳しい試験法 (ASTM C 1260 やデンマーク法) により判定することが妥当であった。さらに、ASR 抑制対策の一つとして高炉セメント B 種の使用が推奨されてきた。しかし、現在、高炉セメント B 種の高炉スラグ微粉末の置換率は 42%程度に設定されているが、ASR 抑制を目的とした使用では高炉スラグ微粉末の置換率をさらに高いものにすべきであると考えられた。

参考文献

- 1) 小林一輔, 牛島栄: これからの長寿命化に備えて, コンクリート構造物の維持管理, 森北出版 (株), 2006.
- 2) 鳥居和之: アルカリシリカ反応にいかに対応するかー試験, 診断と対策の課題, セメント・コンクリート, No.696, pp.1~9, 2005.
- 3) 養田理希, 鳥居和之, 横山博司, 古川柳太郎: PC 梁部材の ASR 劣化に及ぼす高炉スラグ微粉末の効果の確認を目的とした暴露試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.839~844, 2007.
- 4) 養田理希, 古川柳太郎, 尾花祥隆, 鳥居和之: ASR による劣化を生じた PC 梁部材の耐荷力特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1305~1310, 2007.
- 5) 鳥居和之, 野村昌弘, 本田貴子: 北陸地方の反応性骨材のアルカリシリカ反応性試験の適合性, 土木学会論文集, 767 巻, 5-64 号, pp.185~197, 2004.
- 6) 掛布真司, 山本満明, 鳥居和之: ASTM C 1260 による骨材のアルカリシリカ反応性とコアの残存膨張性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.601~606, 2001.